

火力発電所電気設備の予知保全技術

Condition-Based Maintenance of Electrical Equipment in Thermal Power Plants

中川 真一
NAKAGAWA Shin-ichi

関戸 忍
SEKITO Shinobu

辻 勝英
TSUJI Katsuhide

最近の余寿命評価、監視技術の進歩により、これまでの定期点検（以下、定検と略記）を主体とした保守管理方法から、予知保全技術（コンディションベース）に基づいて機器の保守管理を行い、プラントの利用率を向上しようとする動きが高まりつつある。

当社では、発電機主要部位のオンライン／オフラインの監視、試験技術および固定子コイルの絶縁劣化、湿熱劣化の余寿命評価、さらにはデジタル式 AVR（自動電圧調整器）、発電機保護リレーの自動監視機能により劣化／余寿命診断を行いコンディションベースの保守管理を実現すべく開発を進めている。

As a result of recent progress in residual life estimation and monitoring technologies, the condition-based maintenance concept has been developed to replace the previous interval-based maintenance, for improved plant availability.

Toshiba has developed on-/off-line monitoring and testing technologies for generator major parts, as well as residual life estimation of insulation deterioration due to aging and wet-heat in stator windings, in order to realize this condition-based maintenance. Moreover, built-in self-monitoring functions have been incorporated into the digital automatic voltage regulator (AVR) and the generator digital protection relay, to further contribute to condition-based maintenance.

1 まえがき

近年の規制緩和、発電事業自由化の動きの中で、火力発電プラントに対する環境はますます厳しく、かつ急速な勢いで変化している。このような中で、火力発電プラントの保守についても 20 年以上を経過した経年機の増加、ベース負荷からミドル負荷への運転パターンの変化などの課題を克服したうえで、運転信頼性の向上による電力の安定供給、定検インターバルの延長、定検期間の短縮による利用率の向上の必要性に迫られている。

最近の監視技術の進歩により、これまでのインターバルベースの寿命管理から、機器の状態量つまりコンディションをベースとした新しい寿命管理手法、いわゆる予知保全技術が数多く提唱されている。

ここでは、発電機を中心にコンディションベースの新しい寿命管理手法への取組みを紹介するとともに、オンライン監視を装備したデジタル式 AVR、発電機保護リレーについて紹介する。

2 コンディションベースの寿命管理手法

コンディションベースの保守管理手法の概要を簡単に述べる。図 1 は従来の火力発電プラントの保守管理方法の概念を示す。2 年または 4 年ごとの定検時に目視点検、非破壊検査を主体とした点検を行い、機器および構成部品の状態量、劣化度合いを評価し、これらのデータを基に機器の保

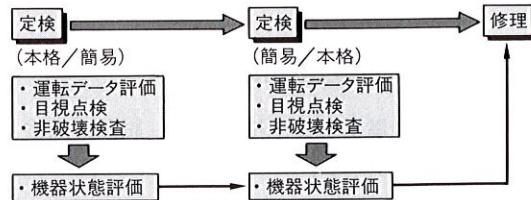


図 1. インターバルベースの保守管理 従来の定検ベースでの保守管理方法の概念を示す。

Interval-based maintenance concept

守を行っていた。

これに対し、コンディションベースの保守管理は機器の劣化、余寿命評価に基づき保守管理手法を決定しようとするもので、まだ技術的課題は残るもの最近ではこの概念が数多く提唱されている。図 2 にコンディションベースの保守管理の概念を示す。運転履歴、オンラインの監視データおよび定検時のオフライン診断のデータを基に機器の劣化、余寿命診断を行い、このデータに基づいて機器の予防保全プログラムを策定し、適切な時期まで運転継続、修理を行うことでプラントの利用率を向上させようとするものである。

さらに、上記保全方法にプラントのライフサイクルを考慮して、プラント運用と協調をとった予防保全プログラムの立案が可能となる。

コンディションベースの保守、つまり予知保全を中心とした保守管理は近年の機器の劣化評価、余寿命診断技術の

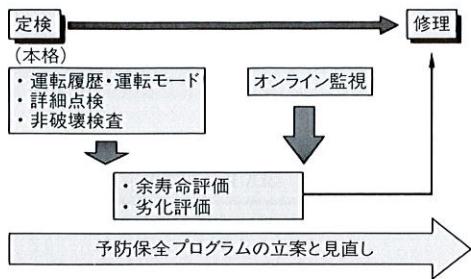


図2. コンディションベースの保守管理 寿命、劣化評価に基づく保守管理方法の概念を示す。

Condition-based maintenance concept

進歩に伴い実現可能となりつつある概念であり、必須(す)となる中心技術として以下が挙げられる。

- (1) オフライン監視技術 非破壊絶縁診断、キャパシタンス測定、制御機器の特性試験
- (2) オンライン監視技術 発電機の状態量監視、デジタル装置の自己監視機能
- (3) 余寿命評価技術 運転履歴に基づく絶縁劣化診断、湿熱劣化診断
- (4) ライフサイクルを考慮した保全策定

3 タービン発電機の予知保全

3.1 タービン発電機主要部位の監視、試験、点検

発電機は各構成部位のオンライン／オフラインの監視、定検時の非破壊絶縁診断による絶縁寿命判定、また水冷却固定子コイルに関してはキャパシタンス測定による湿熱劣化寿命判定を基に予防保全プログラムを策定し、適当な時期に修理を行うことでコンディションベースの保守管理を実現できる。

現在輸出機を含めて実用化されているタービン発電機主要部位の監視、試験、点検方法を表1に示す。

表1. タービン発電機主要部位の監視、試験、点検方法

Monitoring, testing and inspection measures for turbine generator major parts

部 位	オンライン*	オフライン	運転履歴
固定子	主絶縁 部分放電監視	絶縁診断、キャパシタンス測定	履歴からの寿命評価
	鉄心	音速測定	_____
	コイルエンド	目視点検	_____
回転子	ターン絶縁 磁束測定プローブ	インピーダンス測定、分担電圧測定	界磁電流履歴
	対地絶縁 接地検出リレー	絶縁抵抗測定	_____
補機一般	銅粉	目視点検	ターニング時間
	ブラシ ブラシコンデンショニングモニタ	目視点検	界磁電圧履歴
	機内局部過熱 コアモニタ	目視点検	温度履歴

*連続および定期監視を含む

発電機主要部位のオンライン／オフラインの点検、試験方法は個々に実用化されており、今後はこれらデータの評価技術を確立して、運転データと組み合わせた傾向管理技術を開発することが急務である。

3.2 水冷却固定子コイルの湿熱劣化診断

大容量発電機の固定子コイルには水直接冷却を採用している。この冷却方式には多数の長所があるが、冷却水が絶縁層へ浸透した場合絶縁寿命に大きな影響を与えるので、余寿命評価を精度よく行う必要がある。

3.2.1 冷却水漏えいと固定子コイルの湿熱劣化

冷却水漏えいの主な原因として、導体と冷却水集合箱（クリップ）の接合部で異種金属（銅とろう材）が電解質中（冷却水）に存在することによるガルバニック コロージョンがある。これは、ろう付け部に内在する微小ボイドに冷却水が侵入して滞留することにより水質が悪化し、経年的に漏えいパスが形成されて冷却水が絶縁層に浸透する現象である。

固定子コイル絶縁はマイカテープとそれを接着するエポキシレジンで構成されており、冷却水が絶縁層内へ浸透しエポキシレジンが加水分解（湿熱劣化）されると、絶縁耐力が急速に低下する。このため、絶縁層への冷却水浸透の早期発見と、運転・保守計画を検討するための余寿命評価を行なうことが必要である。

3.2.2 キャパシタンス測定

絶縁層吸湿の有無を判断する方法として、絶縁層と水の比誘電率の違いを利用した固定子コイル絶縁表面と導体間のキャパシタンス測定が有効である。測定は誤差を少なくするため絶縁層の厚さが均一で、かつ接地点に近い固定子鉄心端部近傍で実施している。

従来の測定は回転子を引き抜いて手作業で実施していたが、工程短縮の必要性から、キャパシタンス測定ロボットを開発適用したことにより、回転子挿入状態で測定可能となった。図3にキャパシタンス測定ロボットの概要を示す。

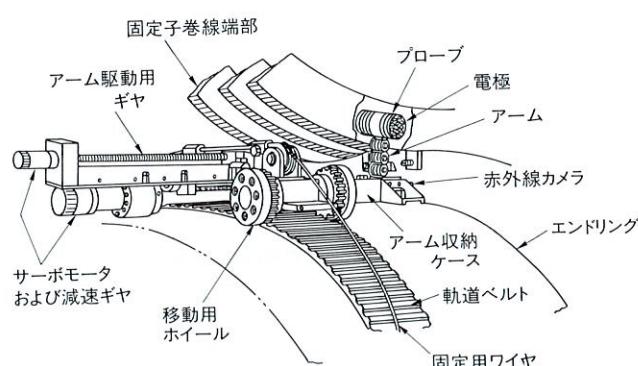


図3. 固定子コイルのキャパシタンス測定 ロボットを用いて回転子挿入状態で固定子コイルのキャパシタンス測定ができる。

Capacitance measurement for water-cooled stator winding

3.2.3 キャパシタンス測定結果の分析と湿熱劣化余寿命評価

キャパシタンス測定データから平均値 m と標準偏差 σ を求め、各コイルについて平均値に対する偏差値を計算する。

一方、これまで実施したサンプリングコイルの詳細調査結果より得られたキャパシタンス偏差値と絶縁耐力の関係(図4)や、経年絶縁劣化および湿熱劣化による運転年数と絶縁耐力レベルの関係(図5)を用いて、吸湿した固定子コイルの残存絶縁耐力が安全運転に必要なレベルに到達するまでの余寿命評価を行えば、コンディションをベースとした予防保全計画を立案でき、以降の保守計画を効率良く進めることができる。

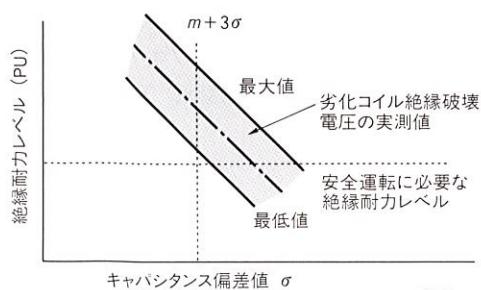


図4. キャパシタンス偏差値と絶縁耐力レベルの関係 劣化コイルの実測値から得られたキャパシタンス偏差値と絶縁破壊電圧値との関係を示す。

Relationship between capacitance deviation and dielectric strength level

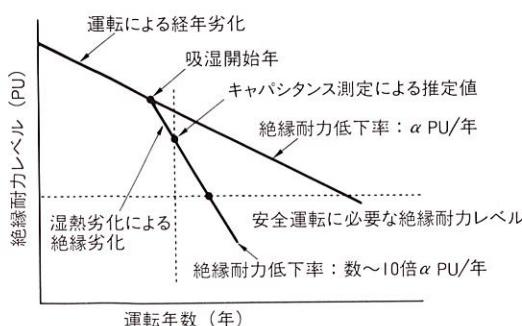


図5. 運転年数と絶縁耐力レベルの関係 固定子コイルの湿熱劣化特性から今後の運転年数と固定子コイルの余寿命が精度よく推定できる。

Relationship between years of operation and dielectric strength level

3.3 固定子コイル絶縁の寿命評価

固定子コイルの絶縁劣化形態は一様ではなく、その耐用寿命は運用方法により異なる。したがって、発電機ごとに絶縁劣化診断と余寿命評価を行い、コンディションをベースとした適切な予防保全計画をたてる必要がある。

当社では、これまで数多くの発電機に対して、発電機停止中に固定子コイルに交流電圧を印加して行う非破壊絶縁特性試験(交流電流特性、 $\tan\delta$ 特性、部分放電特性)による余寿命評価を行ってきた。

これに加えて最近ではエポキシレジン絶縁を採用した発電機について、発電機の運転履歴(運転時間、運転温度、起動停止回数、負荷変動の頻度と幅)と実験室で得られた絶縁劣化要因の損耗率を基に、運転実績に則した固定子コイルの絶縁耐力を計算することができ、以後の運用方法に応じた余寿命を予測することができる。

4 デジタル装置の予知保全

AVR／発電機保護リレーなどの制御機器は、ハードウェアの寿命(金物寿命)とともに、半導体製品の世代交代による部品進歩に伴う寿命(技術寿命)がその製品寿命を支配することが多い。このような製品に対しては、最近のデジタル装置がもつ自己診断機能により連続的な状態監視を行うことによって、コンディションベースの保守管理が実現できる。

このような管理手法を取り入れたものとして、デジタル装置の適用が比較的早い時期から行われていた系統、変電機器の保護装置が、故障データなどを蓄積して保守管理に役だてている例などがあげられる。

一例として、図6は1980年から92年にかけて行われた系統保護リレーの故障実績調査を基に、検査インターバルに関して検討した結果である。

おのおののリレーが故障を内在したまま運用される確率推移が、毎年点検を行ったアナログリレーに対して、デジタルリレーは点検をしなくとも十分に低いことから、アナログリレーでは2年に1度行っていた点検を、デジタルリレーでは6年に1度に延長した根拠となったものである。

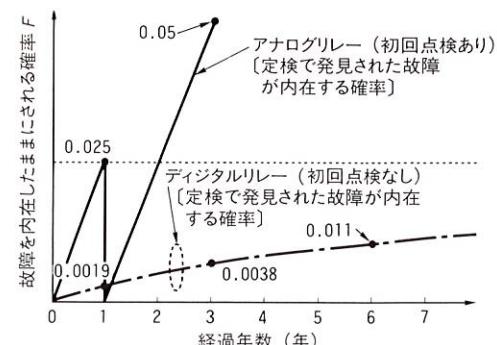


図6. アナログリレーとデジタルリレーの故障を内在したまま運用される確率⁽²⁾ 毎年点検を行ったアナログリレーに対して、点検を行わないデジタルリレーの故障を内在する確率は低い。

Failure probability for analog and digital relay operation

4.1 デジタルリレー

当社は、世界で初めてデジタルリレーを開発し、95年以降に運転を開始したプラントでは半数以上に発電機保護用デジタルリレーが採用されている。

最新の第二世代デジタルリレー(D IIIタイプ)では、サンプリング速度を従来型の30°(電気角ベース)から1/4の7.5°サンプリングに高速化し演算精度の向上を図っている。

また、アナログフィルタの精度監視には従来の自動点検に代わり常時監視可能な高調波重畠監視方式を採用し、高精度の監視を実現している。表2にデジタルリレーの自己診断機能に標準で装備される自動監視機能を示す。最新のデジタルリレーは不良内容の自動識別機能および表示機能を装置し、不良部位の推定と迅速な保修が容易になる。

表2. デジタルリレーの自動監視

On-line self-monitoring functions of digital relay

自動監視	内 容
診断項目	アナログ入力(VT, CT入力など), 整定値, ハードウェア不良, 出力関連
不良内容の識別	不良発生時の内容などの自動識別とデータセーブ
不良部位の診断	不良基板の特定化, 不良要因の解析表示

VT: 計器用変圧器 CT: 変流器

デジタルリレーは、保護性能・機能面の進歩とともに、運用・保守業務の合理化を図るために、ヒューマンインターフェース機能の充実、各種の解析機能を備え、定検業務の省力化、故障発生時の対応の迅速化・容易化を実現している。

また、発電機保護用デジタル保護リレーに使用しているハードウェアは、運転台数が発電機保護用に比べて非常に多い系統保護リレーと共通であることから保守管理の面で下記の利点が期待できる。

- (1) 予備品共有化
- (2) 保守技術共通化
- (3) 故障発生確率データ他の発電機保護リレーの保守管理への有効活用

4.2 デジタル AVR

デジタル AVR は、アナログ AVR のもつ発電機電圧、無効電力制御および電力動搖抑制などの機能を満たしながら、保守を容易にするような機能向上が図られている。

表3にデジタル AVR に標準で装備される自動監視機能の概要を示す。

表3. デジタル AVR の自動監視

On-line self-monitoring functions of digital AVR

自動監視	内 容
自己診断	アナログ入力、励磁制御システム診断、ハードウェア動作、出力関連
過渡事象記録	発電機電圧、界磁電圧などのアナログ信号、ロジック信号を記録し、事故時の解析や従来のオシロ機能として使用。盤に設置した表示器上のグラフ表示や保守ツールによる記録が可能。
運転状態、不良個所の表示	発電機の運転状態の表示、故障部位の表示

デジタル AVR は、88年1月に初号機を製作して以来国内外の火力プラントに適用されている。制御系をデジタル化しているため、従来のアナログ AVR に比べて温度ドリフトがない、機能チェックがソフトウェア上で可能であるなどメンテナンス性に優れているほか、アナログ AVR 以上の信頼性をもっている。

5 あとがき

今後の火力電気設備の保全技術の主流になると考えられるコンディションベースの寿命管理手法と、オンライン監視技術についてその一端を紹介した。発電設備の保守にかかる各位の一助となれば幸いである。

文 献

- (1) 電気学会、電気設備の診断技術、電気学会、1988.
- (2) 電気共同研究会、第二世代デジタルリレー、電気共同研究、50, 1, 1994, p.163.
- (3) 木村軍司、他、あなたの電源設備に不安はないか、電気学会雑誌、112, 12, 1992, p.961-969.



中川 真一 NAKAGAWA Shin-ichi

火力事業部 力電機技術部部長。
火力発電所電気設備のシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員、CIGRE ワーキンググループ日本代表。
Thermal Power Systems Div.



関戸 忍 SEKITO Shinobu

京浜事業所 発電機部参事。
絶縁製造技術、予防保全診断技術に従事。電気学会会員。
Keihin Product Operations



辻 勝英 TSUJI Katsuhide

府中工場 発電制御システム部主査。
電力調整制御システムの開発・設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Works